

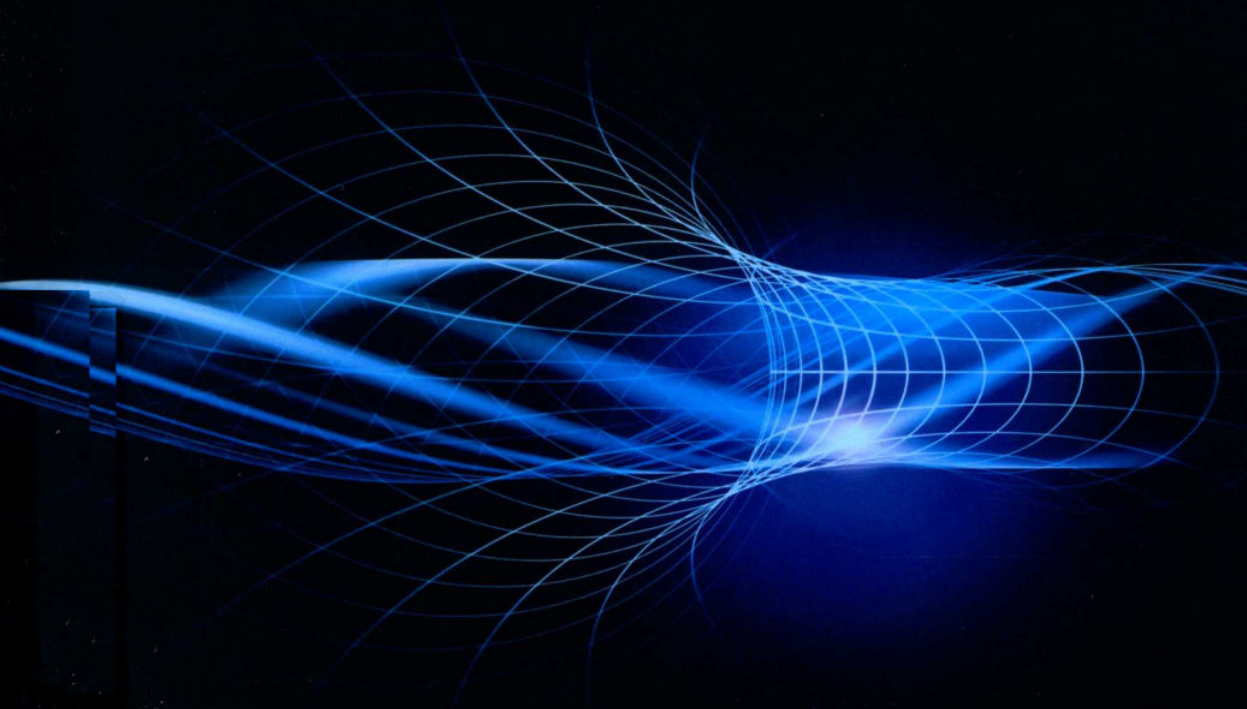


雷 达 吸 波 材 料 隐 身 技 术

磁性核壳结构吸波材料 构建与制备

刘 渊 陈桂明 王 炜 著

CIXING HEKEJIEGOU XIBO CAILIAO
GOUJIAN YU ZHIBEI



化学工业出版社



雷 达 吸 波 材 料 隐 身 技 术

磁性核壳结构吸波材料 构建与制备

刘 渊 陈桂明 王 炜 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

《磁性核壳结构吸波材料构建与制备》系统阐述了雷达吸波材料隐身技术中颇具应用前景的磁性核壳结构吸波材料的构建与制备方法。全书共分7章，分别为绪论，基础理论研究及其实验材料、设备和表征方法介绍，羰基包覆式核壳粉体的制备工艺设计，铁氧体核粒子的形貌结构及性能表征，铁氧体-羰基铁核壳粉体的形貌结构及吸波性能分析、碳材料-羰基铁核壳粉体的形貌结构及吸波性能分析（通过控制工艺参数条件，调控核壳粉体形貌，从而使吸波性能达到最优），羰基铁包覆式核壳型磁性吸波涂层研究。

《磁性核壳结构吸波材料构建与制备》可作为从事隐身技术相关研究人员、材料科学与工程相关专业高年级本科生及研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

磁性核壳结构吸波材料构建与制备/刘渊，陈桂明，
王炜著. —北京：化学工业出版社，2019.11

(雷达吸波材料隐身技术)

ISBN 978-7-122-35122-7

I. ①磁… II. ①刘…②陈…③王… III. ①雷达吸
波材料-磁性材料-研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 191548 号

责任编辑：丁建华 杜进祥

装帧设计：关 飞

责任校对：宋 玮

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 装：三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张10¼ 字数165千字 2020年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888

售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：59.00 元

版权所有 违者必究

前言

在现代高技术信息化战争中，世界各军事强国的武器系统呈现出精确化、隐身化和信息化的特点，率先发现并摧毁对方是决定现代化战争胜负的关键因素。当前隐身技术的研究主要集中在雷达隐身技术上。依据降低目标雷达散射截面积（RCS）的原理，可以将雷达隐身技术分为外形隐身技术和雷达吸波材料（RAM）隐身技术两大类。雷达吸波材料技术因维护简便、适用范围广、性能优异、成本低，成为隐身技术的研究重点。而在雷达吸波材料的基础研究中，高性能吸收剂是其技术核心，设计理论和方法的建立与优化是实现理论和技术突破的关键。

根据目前雷达吸波材料的发展状况，单纯种类的吸收剂很难满足雷达波隐身技术日渐提高的综合要求，性能互补的不同种类吸收剂之间的复合是当前改善吸波性能的有效手段之一。核壳型磁性吸收剂由于其独特的结构和可设计性可使材料具备协同性，近年来成为研究的热点。核壳型磁性吸收剂具有特殊的电子结构和表面性质，通过核粒子和壳粒子之间在微纳米尺度上的有效复合，能够兼具两者的物化特性，充分发挥各组分的协同效应，从而得到一种新型的复合吸收剂。

本书系统阐述了雷达吸波材料隐身技术中颇具应用前景的磁性核壳结构吸波材料的构建与制备方法。全书共分7章，分别介绍了磁性核壳结构吸波材料基础理论研究及分析方法、制备工艺设计、形貌结构及性能分析，并给出了羰基铁包覆式核壳型磁性吸波涂层优化设计及其实际测试结果。可供从事隐身技术相关研究人员、材料科学与工程相关专业高年级本科生及研究生参考。

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正！

作者

2019年10月于西安

主要缩略语

英文缩写	中文名称	英文名称
RAM	雷达吸波材料	Radar Absorbing Material
RCS	雷达散射截面积	Radar Cross Section
CF	碳纤维	Carbon Fiber
CNTs	碳纳米管	Carbon Nanotubes
CI	羰基铁	Carbonyl Iron
MO	金属有机化合物	Metal-Organic Compound
MOCVD	金属有机化学气相沉积	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
XRD	X 射线衍射	X-Ray Diffraction
SEM	扫描电镜	Scanning Electron Microscopy
FESEM	场发射扫描电子显微镜 (电镜)	Field Emission Scanning Electron Microscopy
EDS	能量散射谱	Energy Dispersive Spectroscopy
TEM	透射电镜	Transmission Electron Microscopy
HRTEM	高分辨率透射电镜	High-Resolution Transmission Electron Microscopy
VSM	振动样品磁强计	Vibrating Sample Magnetometer
VNA	矢量网络分析仪	Vector Network Analyzer
FB-MOCVD	流化床-金属有机化学气相沉积	Fluidized Bed-Metal Organic Chemical Vapor Deposition
CA	柠檬酸	Citric Acid
EP	环氧树脂	Epoxy Resin
GA	遗传算法	Genetic Algorithms

目 录

1 绪 论

1

1.1 研究背景及意义	1
1.2 磁性粉体包覆式核壳吸收剂研究现状	2
1.2.1 磁-磁复合核壳型磁性吸收剂	3
1.2.2 电-磁复合核壳型磁性吸收剂	6
1.2.3 存在的问题及发展趋势	9
1.3 碳基金属包覆式核壳型复合粉体研究现状	10
1.3.1 碳基铁包覆式核壳型复合粉体	10
1.3.2 其他碳基金属包覆式核壳型复合粉体	12
1.4 磁性核壳结构吸波材料构建研究及制备技术	12

2 基础理论、实验材料和设备及表征方法

17

2.1 引言	17
2.2 RAM 吸波原理	17
2.2.1 RAM 吸收电磁波的基本规律	17
2.2.2 吸收剂对电磁波的损耗原理	19
2.2.3 RAM 的工作原理	20
2.2.4 多层 RAM 反射率计算	21
2.3 实验材料和设备	23
2.3.1 实验材料	23
2.3.2 仪器设备	24
2.4 主要分析和表征方法	24
2.4.1 X 射线衍射	24

2.4.2	扫描电子显微镜	25
2.4.3	透射电子显微镜	25
2.4.4	振动样品磁强计	25
2.4.5	核壳粉体中羰基铁质量分数的测定	26
2.4.6	同轴试样制备及电磁参数测试	26
2.4.7	吸波涂层制样及反射率测试	27
2.5	小结	28

3 羰基铁包覆式核壳粉体的制备工艺设计

29

3.1	引言	29
3.2	$\text{Fe}(\text{CO})_5$ 热解的理论研究	30
3.2.1	$\text{Fe}(\text{CO})_5$ 热解的热力学分析	30
3.2.2	沉积温度对羰基铁壳层形貌的影响	32
3.2.3	沉积时间对 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 加入量的影响	34
3.3	流化床-金属有机化学气相沉积实验设计	35
3.3.1	装置设计思路	35
3.3.2	装置系统组成	35
3.3.3	实验参数确定	39
3.3.4	核粒子的制备及预处理	42
3.3.5	羰基铁包覆实验步骤确定	46
3.4	小结	46

4 铁氧体核粒子的形貌结构及性能表征

48

4.1	引言	48
4.2	离子取代镍基铁氧体的结构性能表征	49
4.2.1	离子取代镍基铁氧体的结构形貌分析	49
4.2.2	离子取代镍基铁氧体的磁性能分析	51
4.2.3	离子取代镍基铁氧体的电磁参数分析	51

4.2.4	离子取代镍基铁氧体的吸波性能分析	53
4.3	铈掺杂镍基铁氧体的结构性能表征	54
4.3.1	铈掺杂镍基铁氧体的结构形貌分析	54
4.3.2	铈掺杂镍基铁氧体的磁性能分析	56
4.3.3	铈掺杂镍基铁氧体的电磁参数分析	56
4.3.4	铈掺杂镍基铁氧体的吸波性能分析	57
4.4	铈-钴铁氧体的结构性能表征	59
4.4.1	铈-钴铁氧体的结构形貌分析	59
4.4.2	铈-钴铁氧体的磁性能分析	62
4.4.3	铈-钴铁氧体的电磁参数分析	63
4.4.4	铈-钴铁氧体的吸波性能分析	64
4.5	稀土掺杂铈-钴铁氧体的结构性能表征	65
4.5.1	稀土掺杂铈-钴铁氧体的结构形貌分析	65
4.5.2	稀土掺杂铈-钴铁氧体的磁性能分析	66
4.5.3	稀土掺杂铈-钴铁氧体的电磁参数分析	67
4.5.4	稀土掺杂铈-钴铁氧体的吸波性能分析	70
4.6	小结	70

5 铁氧体-羰基铁核壳粉体的形貌结构及吸波性能分析 73

5.1	引言	73
5.2	沉积温度对镍基铁氧体-羰基铁样品的结构性能影响	74
5.2.1	镍基铁氧体-羰基铁样品晶体结构分析	74
5.2.2	镍基铁氧体-羰基铁样品微观形貌分析	74
5.2.3	镍基铁氧体-羰基铁样品电磁参数分析	76
5.2.4	镍基铁氧体-羰基铁样品吸波性能分析	77
5.3	沉积时间对镍基铁氧体-羰基铁样品的结构性能影响	78
5.3.1	镍基铁氧体-羰基铁样品晶体结构分析	78
5.3.2	镍基铁氧体-羰基铁样品微观形貌分析	78
5.3.3	镍基铁氧体-羰基铁样品电磁参数分析	81
5.3.4	镍基铁氧体-羰基铁样品吸波性能分析	81
5.4	沉积温度对铈基铁氧体-羰基铁样品的结构性能影响	85

5.4.1	镍基铁氧化物-羰基铁样品晶体结构分析	85
5.4.2	镍基铁氧化物-羰基铁样品微观形貌分析	85
5.4.3	镍基铁氧化物-羰基铁样品电磁参数分析	86
5.4.4	镍基铁氧化物-羰基铁样品吸波性能分析	88
5.5	沉积时间对镍基铁氧化物-羰基铁样品的结构性能影响	89
5.5.1	镍基铁氧化物-羰基铁样品晶体结构分析	89
5.5.2	镍基铁氧化物-羰基铁样品微观形貌分析	89
5.5.3	镍基铁氧化物-羰基铁样品电磁参数分析	92
5.5.4	镍基铁氧化物-羰基铁样品吸波性能分析	93
5.6	羰基铁壳层质量分数对电磁性能的影响	95
5.7	铁氧化物-羰基铁核壳吸收剂吸波机理分析	98
5.8	小结	99

6 碳材料-羰基铁核壳粉体的形貌结构及吸波性能分析 101

6.1	引言	101
6.2	沉积温度对碳纤维-羰基铁样品结构性能影响分析	102
6.2.1	碳纤维-羰基铁样品形貌结构分析	102
6.2.2	碳纤维-羰基铁样品电磁参数分析	103
6.2.3	碳纤维-羰基铁样品吸波性能分析	104
6.3	沉积时间对碳纤维-羰基铁样品结构性能影响分析	105
6.3.1	碳纤维-羰基铁样品晶体结构分析	105
6.3.2	碳纤维-羰基铁样品微观形貌分析	106
6.3.3	碳纤维-羰基铁样品电磁参数分析	107
6.3.4	碳纤维-羰基铁样品吸波性能分析	109
6.4	沉积温度对碳纳米管-羰基铁样品结构性能影响分析	111
6.4.1	碳纳米管-羰基铁样品形貌结构分析	111
6.4.2	碳纳米管-羰基铁样品电磁参数分析	113
6.4.3	碳纳米管-羰基铁样品吸波性能分析	114
6.5	沉积时间对碳纳米管-羰基铁样品结构性能影响分析	115
6.5.1	碳纳米管-羰基铁样品晶体结构分析	115
6.5.2	碳纳米管-羰基铁样品微观形貌分析	115

6.5.3	碳纳米管-羰基铁样品电磁参数分析	118
6.5.4	碳纳米管-羰基铁样品吸波性能分析	119
6.6	羰基铁壳层质量分数对电磁性能的影响	121
6.7	碳材料-羰基铁核壳吸收剂吸波机理分析	123
6.8	小结	124

7 羰基铁包覆式核壳型磁性吸波涂层研究 126

7.1	引言	126
7.2	单层吸波涂层研究	127
7.2.1	涂层制备	127
7.2.2	涂层形貌分析	127
7.2.3	吸波性能测试	128
7.3	双层吸波涂层研究	129
7.3.1	遗传算法优化设计	129
7.3.2	涂层制备及形貌分析	131
7.3.3	吸波性能测试	132
7.4	环境因素对吸波性能的影响	133
7.4.1	循环加速实验设计	133
7.4.2	表面形貌分析	134
7.4.3	吸波性能分析	136
7.5	小结	138

参考文献 140

1

绪论

1.1 研究背景及意义

随着越来越多的高新科技应用于军事领域，各种先进的武器平台相继问世亮相，“首战即决战，发现即摧毁”成为现代化战争的显著特征之一^[1]。“隐身技术”能够有效降低武器装备的声、电、光、磁等特征信号^[2]，提高战场生存能力和突防打击能力，因而受到了世界各军事强国的重视。

在现代战争中，雷达是对远程目标实施探测、跟踪及识别的主要手段^[3]。因此，在当前隐身技术研究中，雷达隐身技术的研究占有重要地位。依据降低目标雷达散射截面积（RCS）的原理，可以将雷达隐身技术分为外形隐身技术和雷达吸波材料（RAM）隐身技术两大类^[4,5]。RAM作为现代高科技军事装备的基础材料，在雷达隐身技术中占有重要位置。美军采用了RAM的军事装备在20世纪90年代以来的多场局部战争中得到空前应用，取得了非凡的战绩，引起世界各军事大国的广泛关注和持续研究^[6]。目前，美国在RAM领域处于国际领先水平，英、法、德、俄、日等军事大国紧随其后，在该领域取得了很大的进展^[2]。在信息化时代的军事行动中，各国对RAM的性能要求也日渐提高，不仅需要满足“薄、轻、宽、强”的基本要求，更是朝着“纳米化、复合化、智能化、兼容化”的方向发展。

科技的发展使得部队在指挥通信、预警侦察及战场评估等系统中装备了大量电子或电气设备。在复杂的战场电磁环境下，这些设备在运行时会受到周围电磁环境的干扰，尤其是受到敌方定向强电磁干扰，容易产生误动与失控等问题，对其他设备的正常工作产生干扰，甚至被摧毁而丧失战斗力^[7]。

此外，此类设备运行时本身会向周围环境发射电磁能量，易被敌方截获，导致军事秘密的泄露，造成不可挽回的损失^[8]。因此，在复杂电磁环境下的军事行动中，为了确保己方各种电子或电气设备的正常运转，有效遂行对敌方电磁干扰的反击和压制，必须采用有效的电磁屏蔽措施。

军事目标的雷达隐身和电磁屏蔽亟须新型高性能的吸波材料。与上述几个军事强国的研究相比，我国存在研究起步较晚，研究基础相对薄弱等问题。因此，开展高性能吸波材料的研究，对提高我国在这一领域的发展水平，增强武器装备的实战能力、推动部队实战化建设、适应未来战争需要，有着重大而深远的意义。

1.2 磁性粉体包覆式核壳吸收剂研究现状

RAM 是由吸收剂和基体材料两个主要部分组成，能够有效吸收入射电磁波并使其散射衰减的一类功能材料^[9]。常用的基体材料为环氧树脂、天然橡胶、氯丁橡胶及聚氨酯树脂等^[6]。吸收剂在 RAM 中主要起吸收和衰减电磁波的作用，是决定 RAM 吸波性能的关键因素。依据对电磁波损耗机制的不同，传统吸收剂主要分为电损耗型吸收剂和磁损耗型吸收剂^[6]。

RAM 中常用的电损耗型吸收剂主要有导电高分子材料^[10-12]、碳材料^[13-16] 及陶瓷^[17-20] 等。电损耗型吸收剂具有密度小、介电损耗较大等优点，但是由于这些吸收剂本身不具有磁性，导致介电常数与磁导率相差较大，使得其阻抗匹配特性较差，单独使用时性能并不理想，通常是与磁性吸收剂进行复合以调控电磁参数，改善吸波性能。铁氧体及磁性金属为 RAM 中常用的磁性吸收剂。当前铁氧体吸收剂的研究重点是尖晶石型铁氧体及磁铅石型铁氧体^[21-24]。Co、Ni 及其合金与羰基铁粉是磁性金属吸收剂中最主要的两类^[25-29]，具有较高的磁导率和磁损耗。虽然磁性吸收剂的吸波性能相对较为优异，但是密度大，频带窄，高频段易受趋肤效应影响等缺陷仍然是其在 RAM 领域应用时无法回避的难题。

吸波频带窄及匹配厚度大等问题是传统吸收剂发展和应用中始终无法突破的瓶颈，限制了其在 RAM 中的进一步应用。根据目前 RAM 的发展状况，单纯种类的吸收剂很难满足雷达波隐身技术日渐提高的综合要求，多种吸收剂之间的优势互补复合成为 RAM 研究和发展的重点方向^[6]。核壳型磁性吸收剂具有特殊的电子结构和表面性质，通过核粒子和壳粒子之间在微纳米尺

度上的有效复合，能够兼具两者的物化特性，充分发挥各组分的协同效应，从而得到一种新型的复合吸收剂^[30]。核壳型磁性吸收剂按照磁性吸收剂分布不同可以分为磁性粉体填充式核壳型吸收剂（如聚苯胺包覆铁氧体^[31-33]，碳包覆磁性金属^[34-36]等）和磁性粉体包覆式核壳型吸收剂。磁性粉体包覆式核壳型吸收剂是由中心核粒子和磁性粉体包覆壳层组成^[37]。按包覆层的形态不同可分为均匀薄膜包覆和粒子包覆两种^[37]，如图 1.1 所示。核粒子通常是较大粒子，壳层通常是较小磁性粒子构成。

核壳型磁性复合吸收剂按核壳的组成与特征可以分为两种类型：磁-磁复合与电-磁复合。磁-磁复合类型中核粒子与壳层都是由磁性吸收剂组成，将不同类型的磁性吸收剂以核壳结构的形式组合起来拓展吸波性能，有望获得吸收强度大、吸波频段宽的 RAM^[30]。常见的类型主要是磁性金属与铁氧体复合^[38-40]及铁氧体与铁氧体复合^[41-43]，亦有少量在羰基铁表面包覆 Ni、Co 的相关报道^[44,45]，以此调控电磁参数，改善吸波性能。电-磁复合常见的类型主要是碳材料与磁性吸收剂复合^[46-48]及陶瓷与磁性吸收剂复合^[49,50]等。在电损耗型吸收剂表面包覆磁性吸收剂，能够在提高其磁性能，明显改善阻抗匹配能力的同时，利用其密度小的优点，取长补短，有望获得新型轻质带宽的 RAM。

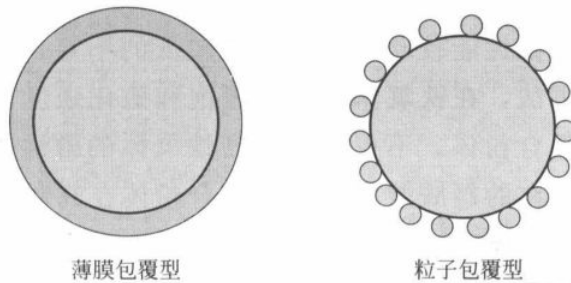


图 1.1 核壳结构磁性复合吸收剂结构示意图

1.2.1 磁-磁复合核壳型磁性吸收剂

(1) 磁性金属-铁氧体复合

传统铁氧体吸收剂面临的主要问题是磁损耗弱、吸波频带窄及匹配厚度大等。传统磁性金属吸收剂的主要问题是高频段容易受到趋肤效应的限制而导致吸波性能恶化。此外，磁性金属吸收剂由于粒径较小、微粒分散和氧化等问题同样困扰着研究人员。将磁性金属与铁氧体复合，可以实现两者之间的优势互补，既可以缓解金属微粉趋肤效应的影响及微粒分散和氧化等问

题,又能够改善铁氧体磁性能不足的缺陷,达到取长补短的目的。铁氧体包覆磁性金属和磁性金属包覆铁氧体是磁性金属-铁氧体复合核壳型吸收剂研究的两个主要方面。

将铁氧体包覆在纳米金属粒子表面得到核壳复合粉体,能够增强金属粒子的稳定性,较好地解决了其易发生团聚、分散性差等问题。利用共沉淀法在纳米 Ni 表面包覆 Fe_3O_4 从而获得具有核壳结构的纳米粉体,吸波性能测试表明,在相同质量比条件下,该纳米粉体吸波性能明显优于核粒子和壳粒子单独作为吸收剂时的吸波性能,而且通过调控核粒子与壳粒子之间的比例,能够有效调节吸波频段和反射率峰值大小^[40]。李婷等^[51]采用液相还原-氧化法成功制备了 Fe-B/ Fe_3O_4 核壳结构纳米复合吸收剂,其反射率在频率为 12.0GHz 时达到最小值(-31dB),反射率低于-20dB 时的频率范围为 10.1~14.2GHz。利用非均匀成核和化学沉淀组合方法,刘姣等^[52,53]在超细 CI 表面原位包覆 MgFe_2O_4 ,对制备工艺、抗氧化性及吸波性能进行了研究。结果表明,复合粉体的抗氧化性能良好,当厚度为 1.5mm 时,最小反射率为-17.8241dB,反射率小于-10dB 时的吸波带宽(频带宽度)为 5.52GHz。Tian N 等^[54]在片状纳米铁表面包覆了纳米 MgFe_2O_4 之后,使 Fe- MgFe_2O_4 核壳粉体具有了较好的阻抗匹配特性,吸波性能明显改善,当涂层厚度为 1.5mm 时,反射率峰值下降 10.4dB,复合粉体的形貌如图 1.2(a) 所示。

为了改善铁氧体磁性能较弱导致磁损耗较低的不足,科研人员常采用化学镀、共沉淀法等方法,在铁氧体表面包覆饱和磁化强度较高的磁性金属构造具有核壳结构的复合粉体,不仅能够提高铁氧体的磁性能,而且可以改善磁性金属在高频下存在的趋肤效应,使得复合粉体在高频时仍能保持较高的磁导率,是改善复合粉体吸波性能卓有成效的途径^[38,39,55-58]。Yan X 等^[38]制备了纳米 Co 包覆 Ni-Zn 铁氧体的核壳结构复合吸收剂。吸波性能分析结果表明,复合粉体的最小反射率为-33.8dB,小于-20dB 时的吸波带宽为 7.6~12.1GHz,而且通过改变核粒子与壳粒子之间的质量比可以有效地调节吸波性能[图 1.2(b)]。武晓威等^[55]采用化学镀的方法在 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 表面成功包覆了 Ni-P 合金壳层,复合粉体具有较好的吸波性能,2~18GHz 时的最小反射率为-23.4dB,小于-10dB 时的吸波带宽达到 2.8GHz。在 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 表面采用化学镀的方法沉积 Ni^[56]及 Ni-P^[57]薄膜能够实现核壳组分之间的取长补短,从而改善吸波性能。如 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ -Ni 核壳结构复合粉体最小反射率达到-41.3dB,吸波带宽(<-10dB)达到 8GHz,优于单纯的 Ni 及 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 的吸波性能^[56]。Wang G 等^[58]在纳米 Fe_3O_4 表面包覆了一层纳米

Co 壳层，结果表明核壳粉体能够获得比单纯 Fe_3O_4 更加优良的吸波性能，小于 -10dB 时的吸波带宽达到 2.9GHz 。

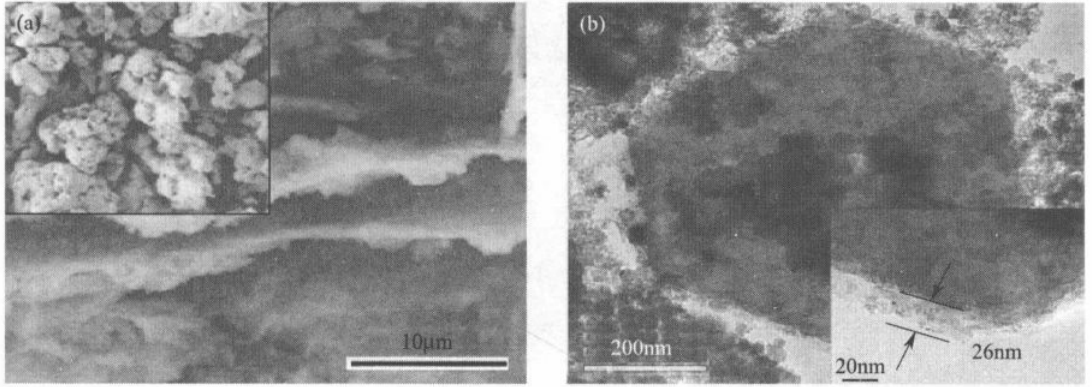


图 1.2 $\text{Fe-MgFe}_2\text{O}_4$ (a) 和 $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4\text{-Co}$ (b) 核壳吸收剂的形貌图

(2) 不同类型铁氧体复合

自然共振是铁氧体吸收剂损耗电磁波的主要机理，类型不同的铁氧体，共振频段往往各不相同。因此，铁氧体之间的复合可以使不同的共振频段叠加互补，从而拓宽复合粉体的吸波带宽，提高吸波性能。

尖晶石型铁氧体吸收剂的研究在国内外已有很长的历史，但是由于各向异性场 (H_A) 很小，使得其在微波频段的磁导率及吸收特性不及六角晶系铁氧体。因此，研究中常将尖晶石型铁氧体和六角晶系铁氧体进行有效复合^[42,43,59-61]。采用共沉淀法将 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 与 Fe_3O_4 复合制备成具有核壳结构的复合粉体，能够有效结合两者的优点，实现优势互补，在低频段和高频段都有较好的吸波效果^[59]。陈映杉等^[60] 通过溶胶-凝胶法，制备出包覆良好，分层界面清晰的 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-ZnFe}_2\text{O}_4$ 核壳结构复合粉体，如图 1.3 所示。该复合粉体在 $8\sim 18\text{GHz}$ 频率范围内，吸波性能逐渐增强，当频率为 12GHz 时，反射率达到最小值，为 -9.7dB 。理论分析表明，核壳结构能够增加电磁波在传输反射过程中的波长，从而增强吸波性能^[60]。

将不同种类的尖晶石型铁氧体复合是改善粉体电磁性能的有效手段。Hong R Y 等^[62] 制备了具有核壳结构的 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 复合粉体，其饱和磁化强度达到 $68\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ，具有良好的电磁性能，在 RAM 领域具有潜在的应用价值。Song Q 等^[63] 在 CoFe_2O_4 表面包覆 MnFe_2O_4 得到了具有良好电磁性能的核壳粉体。Honarbakhsh-Raouf A 等^[64] 采用溶胶-凝胶法在 CoFe_2O_4 表面成功包覆了 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ，得到了具有核壳结构的复合粉体，

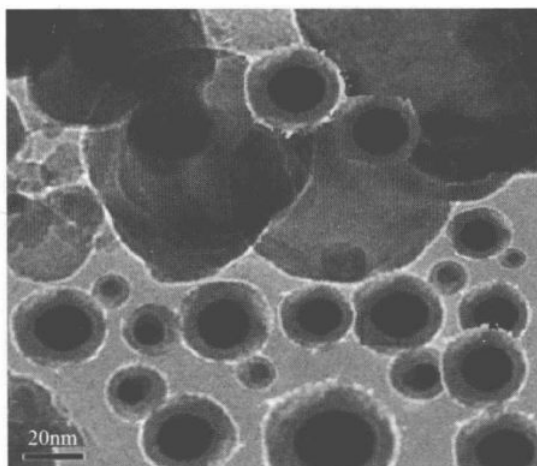


图 1.3 SrFe₁₂O₁₉-ZnFe₂O₄ 核壳吸收剂的形貌图

两者之间的复合有效改善了 Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ 的磁性能。

1.2.2 电-磁复合核壳型磁性吸收剂

(1) 碳材料-磁性吸收剂复合

碳材料具有原料来源广泛和密度低等优点，被广泛应用于 RAM 中，是电损耗型吸收剂中非常重要的种类。对于碳材料吸收剂的研究是以炭黑、石墨等材料为起点，由数代人的努力逐步丰富和发展起来，形成了当今以碳纤维 (CF)、碳纳米管 (CNTs) 为重要支撑，传统 (炭黑、石墨) 与新型 (石墨烯) 吸收剂并存的格局。在碳材料表面包覆磁性吸收剂，一方面能够极大地提高碳材料的磁性能，明显改善其阻抗匹配能力，有效提高吸波性能；另一方面则可以获得比磁性吸收剂的密度显著降低的复合粉体，使得碳材料-磁性吸收剂在轻质 RAM 领域有了潜在的应用前景。

① CF-磁性吸收剂复合 CF 是功能与结构一体化的优良吸收剂，具有质轻、硬度高、高温强度大及耐腐蚀等特点^[65]。在 CF 表面包覆 Fe₃O₄，能够通过调节 Fe₃O₄ 的形貌及包覆量而改变复合吸收剂整体的性能，是提高其吸波性能的有效手段之一^[66-68]。Qiang C 等^[66] 通过工艺条件控制 Fe₃O₄ 的形貌，成功制备了 CF-Fe₃O₄ 核壳结构复合吸收剂，如图 1.4(a) 所示。吸波性能测试结果表明，厚度在 2.5~5.12mm，反射率小于 -10dB 时的吸波带宽为 6.49GHz，反射率小于 -20dB 时的吸波带宽为 2.62GHz；厚度为 4.41mm 时，最小反射率为 -35dB。Meng X 等^[67] 用电镀法在 CF 表面原位包覆了纳米 Fe₃O₄ 获得了吸波性能优良的复合吸收剂，当厚度为 4mm 时，复合粉体

的最小反射率小于-30dB。

相比在 CF 表面包覆铁氧体涂层, 研究人员更青睐在 CF 表面包覆 Ni、Co 及 Ni-Fe 合金等磁性金属微粉或金属合金^[69-73]。Park K Y 等^[69] 制备了 CF-Ni/Fe 核壳结构复合吸收剂 [图 1.4(b)], 当吸收剂质量分数为 3%, 厚度为 2.3mm 时, 在 X 波段反射率小于-10dB 时的吸波带宽为 2.8GHz; 提高吸收剂质量分数 (40%) 和厚度 (2.4mm), 在 X 波段反射率小于-10dB 时的吸波带宽为 3.7GHz。Wang L 等^[71] 用电镀法在 CF 表面成功包覆了厚度约为 0.5 μ m 的 Fe-Co 合金, 当厚度为 1.3~6.0mm 时, 反射率小于-10dB 时的吸波带宽能够覆盖 2~18GHz, 反射率小于-20dB 时的吸波带宽达到 6.8GHz; 当厚度为 1.7mm 时, 最小反射率为-48.2dB。

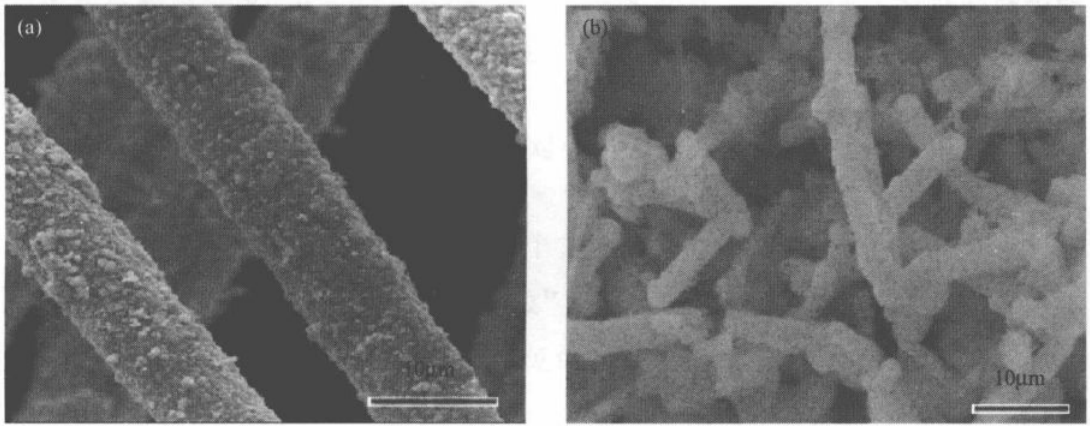


图 1.4 CF-Fe₃O₄ (a) 和 CF-Ni/Fe (b) 核壳吸收剂的形貌图

② CNTs-磁性吸收剂复合 CNTs 作为一维纳米材料具有密度小、耐高温、稳定性好等优点, 是应用前景十分广阔的吸收剂之一^[74]。研究人员通常将金属及金属合金等磁性材料涂覆在 CNTs 表面, 以提高复合粉体的吸波性能^[75-79]。Wen F 等^[75] 制备了 CNTs-Fe、CNTs-Co 和 CNTs-Ni 三种核壳结构复合粉体, 图 1.5(a) 所示为 CNTs-Fe 复合粉体。研究结果表明, CNTs-Fe 的吸波性能明显优于其他两种复合粉体, 当厚度为 4.27mm 时, 最小反射率为-39dB。姚文惠等^[76] 为了提高 CNTs 的吸波性能, 在 CNTs 表面镀覆了一层 Ni-Co-La 合金层, 最低反射率达到-14.3dB, 反射率小于-5dB 时的吸波带宽为 5.0~7.0GHz, CNTs 表面化学镀覆 Ni-Co-La 合金后在其原有较高的介电损耗基础上兼具明显的磁损耗是吸波性能改善的主要原因。丁鹤雁^[77] 研究了 CNTs-Co 及 CNTs-Co-Fe 核壳结构复合粉体 700 $^{\circ}$ C 下热处理之后的吸波性能, 表明 CNTs 表面包覆 Co 及 Co-Fe 合金后, 其饱和磁化强度明显提